

Würzburg, 1959

Aus der Klinik für Haut- und Geschlechtskrankheiten
der Universität Würzburg

Kommissarischer Vorstand: Professor Dr. med. H. Saar

Thema

Strahlenschutzmessung

bei der Arbeit mit radioaktiven Substanzen

INAUGURAL-DISSERTATION

verfaßt und der

Hohen Medizinischen Fakultät

der

Julius - Maximilians - Universität Würzburg

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

vorgelegt von

Erich Vielhauer

aus Bocholt

LANE LIBRARY, STANFORD UNIVERSITY

Würzburg 1959

Aus der Klinik für Haut- und Geschlechtskrankheiten
der Universität Würzburg

Kommissarischer Vorstand: Professor Dr. med. H. Saar

Thema

Strahlenschutzmessung
bei der Arbeit mit radioaktiven Substanzen

INAUGURAL-DISSERTATION

verfaßt und der

Hohen Medizinischen Fakultät

der

Julius - Maximilians - Universität Würzburg

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

vorgelegt von

Erich Vielhauer
aus Bocholt

Würzburg 1959

Referent: Professor Dr. med. G. Bonse

Korreferent: Professor Dr. W. Wachsmuth

Tag der Promotion:

30. 4. 59

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität Würzburg

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Die natürliche Strahlenbelastung	5
II. Zusätzliche Strahlenbelastung durch zivilisatorische Einflüsse	6
III. Das Problem der Toleranzdosis	8
IV. Strahlenschädigungen	11
Krebs und Leukämie nach Bestrahlung	12
Strahlenschäden nach Inkorporation radioaktiver Substanzen	13
V. Methoden der Strahlenschutzmessung	15
Leuchtschirmmethoden	15
Photographische Methode	16
Ionisationsmethoden	17
Geiger-Müller Zählrohr	19
VI. Ergebnisse der Strahlenschutzmessungen	21
Literaturverzeichnis	33

Druck: Werkbund-Druckerei, Würzburg, Heinstraße 3a

I. Die natürliche Strahlenbelastung

Der Mensch und alle Organismen der Erde sind einer dauernden Einwirkung energiereicher, ionisierender Strahlen ausgesetzt. Diese natürliche Strahlenbelastung wird nach Schraub (54) durch zwei Gruppen von Strahlungsquellen hervorgerufen. Der Ausgangspunkt der Strahlen der ersten Gruppe liegt außerhalb des Körpers, während zur zweiten Gruppe alle Strahlungen zu zählen sind, die beim Zerfall radioaktiver Substanzen innerhalb des Körpers entstehen.

Zur ersten Gruppe gehört die kosmische Strahlung. Beim Auftreffen der sogenannten Primärteilchen — schnellfliegende Kerne der sich im Weltraum befindenden Materie — auf die Lufthülle entstehen neben den sogenannten Pi-Mesonen, alle **uns von der natürlichen** und künstlichen Radioaktivität bekannten Elementarteilchen und Gamma-Quanten. Ferner gehört zu dieser Gruppe die sogenannte Umgebungsstrahlung, die von den radioaktiven Elementen der Erdkruste ausgeht und zwar hauptsächlich von ^{226}Ra , ^{232}Th und ^{40}K . Der dritte Faktor der Strahlenbelastung, die von außen auf den Organismus einwirkt, ist die Strahlung aus dem Atmosphärenraum, bedingt durch den Gehalt der Luft an Emanationen der Ra- und Th-Serien.

Zur zweiten Gruppe zählen die radioaktiven Isotope ^{40}K , ^{14}C und ^{226}Ra , die auf dem Umweg über Pflanzen und Tiere inkorporiert werden, und die vorher schon erwähnten Emanationen, die besonders auf das Epithel des Respirationstraktes einwirken. Zu beachten ist fernerhin, daß es bei den Elementen der Ra- und Th-Zerfallsreihen zu einer selektiven Speicherung in den Knochen kommt. So besitzt z. B. der Knochen eine drei- bis zehnfache Konzentration an Ra im Verhältnis zum übrigen Gewebe (54). Die genaueren Werte über die Höhe der natürlichen Strahlenbelastung aufgegliedert in die einzelnen Komponenten, sind in Tabelle 1 aufgeführt (nach Schraub (54)).

Tabelle 1 (nach Schraub (54))

Die natürliche Strahlenbelastung des Menschen, aufgegliedert in die einzelnen Komponenten

Kosmische Strahlung	35 (33-37)	mr/Jahr
Umgebungsstrahlung	70 (40-240)	mr/Jahr
Kalium 40	19	mr/Jahr
Kohlenstoff 14	1	mr/Jahr
Radium (im Knochen) (Osteocytenbelastung)	50 mrem/Jahr	
Radon-Folgeprodukte (Lunge)	25-250 mrem/Jahr	

II. Zusätzliche Strahlenbelastung durch zivilisatorische Einflüsse

In den fortgeschrittenen, zivilisierten Ländern ist es zu einer erheblichen Änderung des „Strahlenmilieus“ gekommen. Die weitgehende Verwendung ionisierender Strahlen und natürlicher sowie künstlicher radioaktiver Substanzen in Medizin, Forschung und Technik, der Bau von Kernreaktoren und die Auslösung von Atom-bombenexplosionen bedingen eine stärkere Strahlenbelastung weiter Bevölkerungskreise. Wesentlich ist, daß wir, besonders in Deutschland, erst im Beginn dieser Entwicklung stehen, vor allem in Bezug auf den Bau von Kernreaktoren und die Erprobung von nuklearen Waffen.

In der Medizin ist die erhöhte Strahlenbelastung zurückzuführen auf die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Isotope in Diagnostik und Therapie. Dadurch wird der weitaus größte Teil der zusätzlichen Belastung durch zivilisatorische Einflüsse gestellt, wie aus Tabelle 2 hervorgeht. Eine statistische Erhebung in den USA, die 1953 von der AUS Public Health durchgeführt wurde, ergab, daß während dieser Zeit pro Person innerhalb eines Jahres eine Dosis von zwei r allein zu diagnostischen Zwecken verabfolgt wurde (zitiert bei Muth (39). Zwei weitere Zahlenbeispiele sollen zeigen, in welchen Größenordnungen die Dosen bei der Verwendung radioaktiver Substanzen zur Diagnostik liegen (39). Bei der Schilddrüsenfunktionsprüfung mit ^{132}J beträgt die Belastung der Schilddrüse ca. 100 rad; bei der Blutvolumenbestimmung mit ^{32}P ist die verabfolgte gesamte Strahlendosis 50 m rad.

In diesem Zusammenhang sei auch auf die Gonadendosis bei diagnostischer Anwendung von Röntgenstrahlen eingegangen. Diese beträgt nach einem Bericht der US National Academy of Science (67), umgerechnet auf die Gesamtbevölkerung, in 30 Jahren 3 r. In Tabelle 2 ist die gesamte Gonadendosis, mit der die Bevölkerung in Großbritannien belastet wird, wiedergegeben, aufgeteilt in die einzelnen Komponenten.

In der Therapie ist die Strahlenbelastung gegeben durch die Anwendung von Röntgenstrahlen sowie Gamma-Strahlern, insbesondere Ra und ^{60}Co zur Tumorbildung und Entzündungsbehandlung; außerdem durch verschiedene weitere radioaktive Isotope, die z. B. zur Behandlung von Hyperthyreosen oder Polycythaemie verwendet werden.

Die Strahlenbelastung des Personals in medizinischen Betrieben soll an dieser Stelle nicht näher erörtert werden; darüber wird weiter unten ausführlich berichtet. Vorweggenommen sei nur, daß die Strahlenbelastung des Personals in Radiumbetrieben erheblich höher ist, als die des Röntgenpersonals (28).

Durch die technische Anwendung ionisierender Strahlen ist eine weitere Möglichkeit zur erhöhten Belastung gegeben. Zur Materialprüfung werden neben Röntgenstrahlen immer mehr Gamma-Strahler, besonders ^{137}Cs und ^{60}Co verwendet. Bei sachgemäßer Anwendung ist jedoch das Bedienungspersonal weitgehend geschützt. Anders liegen jedoch die Verhältnisse der radiumverarbeitenden Industrie. Die dort Beschäftigten sind einer Belastung ausgesetzt, die weit über der Dosis der natürlichen Bestrahlung liegt. Außerdem besteht stets die Gefahr einer Inkorporation.

Aus einer Arbeit von Libby (29) geht hervor, daß noch eine ganze Reihe weiterer Strahlungsquellen zu einer erhöhten Belastung führen kann, z. B. die Leuchtziffern von Armbanduhren und Instrumenten, Uranerz und Phosphatsalz, ein handelsüblicher Dünger, der einen gewissen Prozentsatz an Uran enthält. Weiterhin entstehen in Oszillographen und anderen Kathodenstrahlröhren und in Gleichrichterröhren von Röntgengeräten ionisierende Strahlen.

Als Strahlungsquellen seien noch die sogenannten Teilchenbeschleuniger — Cyklotron, Betatron und Protonen — Synchrotron — erwähnt. Jedoch ist der betroffene Personenkreis relativ klein, da sie fast ausschließlich zu Forschungszwecken verwendet werden.

Durch Kernreaktoren ist eine weitere zusätzliche Strahlenbelastung zu erwarten. Wie Tabelle 2 zeigt, ist die Bestrahlungsdosis des Personals bemerkenswert gering. Ein Problem, das für die Zukunft von größter Bedeutung werden wird, ist die Beseitigung der hochradioaktiven Spaltprodukte aus den Kernreaktoren, ganz besonders dann, wenn, wie zu erwarten ist, der größte Teil der Elektrizitätsenergie in Kernreaktoren erzeugt wird. Die Strahlenbelastung durch Atombombenexplosionen ist bis heute noch relativ gering geblieben (Tabelle 2), obschon auch in der weiteren Umgebung der Explosionen mit einer erhöhten zusätzlichen Belastung gerechnet werden muß, besonders durch den Gehalt der Luft an radioaktivem Staub.

Eine Übersicht über die Werte der natürlichen Strahlenbelastung und die der zusätzlichen Belastung durch zivilisatorische Einflüsse gibt die Tabelle 2 wieder. In ihr ist die Höhe der Gonadendosis wiedergegeben, die der maßgebende Wert für die Belastung des genetischen Materials einer Bevölkerung ist.

Tabelle 2

Vergleich der natürlichen Strahlenbelastung mit der von künstlichen Strahlenquellen (zusammengestellt von Muth (39) nach Angaben von A. Howard und von W. G. Marley)

Strahlenquellen

Mittlere Dosis in Millirad (Gonaden) pro Individuum pro Generation (30 Jahren) (nach Erhebungen in Großbritannien)

Natürliche	3400
Künstliche	
Diagnostische Untersuchungen	700
Berufliche Strahlenbelastung ohne	
Berücksichtigung der Reaktorbetriebe	50
Berufliche Strahlenbelastung,	
nur Reaktorbetriebe	3
Schuhdurchleuchtung	3
Leuchtziffern von Armbanduhren	60
Fernsehen	30
Atomkernversuchsexplosionen	30
Gesamtbelastung durch künstliche	876
Einflüsse	26% der natürlichen Belastung

III. Das Problem der Toleranzdosis

In engem Zusammenhang mit den Ergebnissen der Forschungen über die zusätzliche Strahlenbelastung steht die Frage nach der Toleranzdosis, d. h. der Dosis, die nach dem Stand der Wissenschaft als unwirksam oder wenigstens unschädlich angesehen werden kann. Dabei ist es zweckmäßig, diese Frage einmal vom genetischen Standpunkt und zum anderen vom Gesichtspunkt der Schädigung des funktionierenden Organismus aus zu betrachten.

Die Einwirkung ionisierender Strahlen auf genetisches Material ruft irreversible Genveränderungen hervor, die sich über alle Folgegenerationen halten, sofern sie nicht letal sind. Diese Mutationen sind meist rezessiv und sogenannte Minusvarianten oder Letalfaktoren. Sie wirken also in homocygotem Zustand letal oder setzen die Vitalität stark herab. Auch in heterocygotem Zustand scheinen die Individuen oft geschädigt. Jede, auch die geringste Dosis, erhöht die Gesamtmutationsrate, d. h. der Mutationsrate, die sich aus der Spontanmutationsrate und der durch Strahlung induzierten Mutationsrate zusammensetzt. Darüber hinaus summieren sich die Wirkungen über die Zeit, so daß wir nicht von Einzeldosen, sondern von der sogenannten Generationsdosis zu sprechen haben (32).

Dies zeigten strahlengenetische Experimente von Patterson (42), Hanson und Heys (20) und besonders Timofeëff-Resovsky und Zimmer (60).

Patterson (42) bestrahlte *Drosophila melanogaster* mit einer Röntgendosis von 1250 r einmal ganz in 10 min. und außerdem fraktioniert in 8 Teilen und auf Zeiträume von 4–8 Tagen verteilt. Die Mutationsrate blieb gleich.

Hanson und Heys (20) applizierten *Drosophila* gleiche Dosen von Gammastrahlen einmal in 0,5 bzw. einer Stunde und verdünnt

in 75 bzw. 150 Stunden. Auch bei diesen Versuchen blieb die Mutationsrate gleich.

Experimente von Timofeëff-Ressovsky und Zimmer (60), ebenfalls an *Drosophila melanogaster*, erwiesen, daß weder eine Verdünnung der Dosis bis zu einem Verhältnis von 1:300, noch eine Fraktionierung mit Änderungen der Gesamapplikationszeit bis zu einem Verhältnis von 1:1440 die Mutationsrate beeinflussen können. Er führt dazu 1935 aus: „Für die Erbschädigung wird der Begriff der Toleranzdosis überhaupt hinfällig, da in diesem Fall nicht eine Restitution, sondern eine Summierung der Einzelschäden stattfindet. Da Stichproben an anderen Objekten Mutationen von ungefähr gleicher Größenordnung ergaben, und wir keinen Grund haben anzunehmen, daß es beim Menschen viel anders sein könnte, so müßte die zulässige Toleranzdosis mit Rücksicht auf eventuell mögliche Erbschäden, so tief wie nur praktisch möglich gesetzt werden.“

Müller (34) geht aus von der spontanen Mutationsrate der Säugetiere und von der Vorstellung, daß höchstens eine Verdopplung der Mutationsrate zulässig sei. Er kommt zur Überzeugung, daß die Generationsorgane bis zum Abschluß der Zeugungsperiode nicht stärker als mit mehr als 20 r bestrahlt werden dürften.

Marquardt (32) faßt das Problem in folgenden Sätzen zusammen: „Im Grunde genommen zwingen uns diese experimentell gesicherten Tatsachen jede zusätzliche Strahlen- und damit Mutationsbelastung zu vermeiden, die über die spontan gegebene Mutationsrate hinausgeht. Das würde aber heißen, daß als zulässige Toleranzdosis von genetischer Seite die natürliche Strahlenbelastung des Menschen, d. h. 2–3 r (im amerikanischen Bericht 4–5 r) pro Generationszeit vorgeschlagen wird und kein Raum für eine irgendwie geartete zusätzliche Strahlendosis bleibt. Von der Wirklichkeit ist aber eine derartige Stellungnahme bereits überholt. Um der bestehenden und nicht zu ändernden Situation Rechnung zu tragen, sieht sich daher der Genetiker veranlaßt, die Toleranzdosis so hoch zu rücken, daß für die heute und morgen unausweichliche Strahlenbelastung durch die Technik Platz bleibt, ohne allzu große Gefährdung der nachfolgenden Generationen durch die Konsequenzen zu zahlreich eingetretener Mutationen. Nach dem heutigen Stand unserer Kenntnisse erscheint somit eine Strahlendosis, die etwa 25% der eine spontane Mutationsrate verdoppelnden Dosis beträgt, vertretbar zu sein. Dies würde bedeuten, daß pro Generationszeit, d. h. in den ersten 30 Lebensjahren etwa 10 r als zulässige Strahlendosis für eine Bevölkerung angesehen werden dürfte.“

Schon sehr bald war man bemüht, die Höhe der Dosis zu bestimmen, die nur eine solche Strahlenbelastung zuließ, die den funktionierenden Organismus nicht zu schädigen vermochte. Mutscheller (40) versuchte 1925 auf Grund von Nachfragen und Messungen

in amerikanischen Röntgeninstituten die Toleranzdosis festzustellen. Er kam dabei zu folgendem Ergebnis: „Nach dem gegenwärtigen Stand der Wissenschaft scheint 1/100 der Hauterythemdosis auf 30 Tage verteilt die Toleranzdosis für alle Bedingungen beim Arbeiten von Röntgenstrahlen zur Röntgenographie, Röntgenoskopie und Röntgentherapie zu sein.“ Gleichzeitig bemerkt er, daß er „zu diesem Ergebnis durch eine begrenzte Zahl typischer Fälle gekommen sei. Diese Zahl könne sich vielleicht später nach der einen oder anderen Seite hin verschieben.“

Glocker (16) rechnet im Anschluß an Mutscheller (40) ebenfalls mit einer Toleranzdosis von 1/100 der Hauterythemdosis im Monat. Er kommt zu einer Tagesdosis von 0,24 r bei einem achtstündigem Arbeitstag. Die Ergebnisse von Mutscheller (40) dienen zur Grundlage für die deutschen Strahlenschutzvorschriften (65), die 1930 als höchstzulässige Tagesdosis 0,25 r angeben. Da für die Angabe einer Toleranzdosis beim Menschen die experimentellen Grundlagen fehlten, war eine solche Dosis nur mit einer gewissen Willkür anzusetzen. Wie weit die Ansichten über die Höhe der Toleranzdosis differierten, zeigt ein Vergleich der höchst zulässigen Dosen in verschiedenen Staaten aus den Jahren 1949/50 (nach Jaeger (39)):

Deutschland	0,25 r/Tag	1,5 r/Woche (1949)
England	0,1 r/Tag	0,5 r/Woche (1950)
USA	0,05 r/Tag	0,3 r/Woche (1949)
Schweden	0,01 r/Tag	0,05 r/Woche (1949)

Um eine einheitliche Regelung in der Frage der Toleranzdosis zu erreichen, wurde 1950 in London von der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP) folgende Empfehlung, die auch heute noch als verbindlich angesehen wird, gegeben: „Unter Umständen, bei denen der ganze Körper über eine unbegrenzte Zeit einer Röntgen- oder Gammastrahlung bis zu einer Quantenenergie von 3 MeV ausgesetzt ist, soll die maximal zulässige Dosis 0,5 r in jeder Woche betragen. Diese Dosis entspricht 0,3 r/Woche in freier Luft gemessen. Es wird empfohlen, daß in dem Fall der Bestrahlung der Hände und Unterarme die maximal zulässige Dosis 1,5 r in jeder Woche betragen soll (66).“

Daß diese Dosis nicht unumstritten als unschädlich oder unwirksam anerkannt wird, zeigen Arbeiten verschiedener Autoren. In einer zusammenfassenden Veröffentlichung gibt Muth (38) einen Überblick über Angaben verschiedener amerikanischer und schwedischer Autoren aus den Jahren 1946–1951. Das Blutbild von Personen, die jahrelang einer Bestrahlung bis zu 0,1 r/Tag ausgesetzt waren, zeigte Veränderungen, die vorwiegend in Leukopenien, Anaemien und Auftreten von pathologischen Blutelementen bestanden.

Nach Versuchen von Boche (zitiert bei Muller (34), der bei Säugetieren eine Lebensverkürzung bei einer Dauerbestrahlung von

0,1 r/Tag feststellte, folgert Muller (34), daß sich für den Menschen eine mittlere Lebensverkürzung von 3 Jahren ergibt, wenn er einer Dauerbestrahlung von 0,1 r/Tag, auflaufend auf 30 r/Jahr, ausgesetzt ist.

Rajewsky (49) führt zu diesem Thema auf Grund von eigenen Experimenten aus: „Diese Ergebnisse (gemeint sind die Ergebnisse seiner Experimente) lassen vermuten, daß, ebenso wie für genetische Schäden, auch für physiologische Schäden keine Grenzdosis existiert. Unter diesen Umständen würde man sich ebenso verhalten müssen wie die Genetiker. Man könnte also — wenn auch nicht ganz ohne Willkür sagen, daß nicht mehr als das Doppelte oder Fünffache der natürlichen Strahlenbelastung verabfolgt werden soll. Zur endgültigen Klärung des Problems sind jedoch weitere Versuche erforderlich.“

Die Frage nach der Toleranzdosis bei der Inkorporation radioaktiver Substanzen wurde in den Empfehlungen der Internationalen Kommission für Strahlenschutz 1953 dahingehend entschieden, daß als höchstzulässige Dosis 0,3 rem pro Woche anzusehen sei (68).

IV. Strahlenschädigungen

Die Röntgenstrahlen und die von natürlichen und künstlichen radioaktiven Substanzen ausgesandten energiereichen Strahlen sind in der Lage, bestrahlte Materie zu ionisieren, d.h. Elektronen aus der Elektronenhülle herauszuschleudern und somit Ionenpaare zu bilden. Dieser Vorgang ist der physikalische Primärvorgang, auf dem die biologische Wirkung dieser Strahlen beruht (48). Es kommt unter Umständen zur Zerstörung lebenswichtiger Einheiten der Zelle, oder es entstehen in der Umgebung dieser Einheiten schädliche Zerfallsprodukte, die dann auf diese einwirken. Dadurch werden am Orte der Absorption der Strahlenenergie lokale, destruktive Veränderungen hervorgerufen, die in der Radiologie gut bekannt sind, da bei der therapeutischen Anwendung von ionisierenden Strahlen auch gesundes Gewebe und gesunde Organe mehr oder weniger mitbestrahlt werden. Am bekanntesten ist das Röntgenerythem der Haut, aus dem sich bei Überdosierungen schlecht heilende Ulzerationen und Nekrosen entwickeln können. Auch in inneren Organen werden durch ionisierende Strahlen Schädigungen gesetzt, die bis zur Degeneration der Organe und zum Zerfall des Gewebes führen können. Auf Grund von histologischen Untersuchungen von Bloom und Jacobson (6,7), die sie an Tieren zu verschiedenen Zeitpunkten nach Ganzkörperbestrahlung durchführten, lassen sich Organe und Gewebe mit abnehmender Strahlenempfindlichkeit in folgender Reihenfolge anordnen:

- | | |
|---|---|
| 1. lymphatische Organe | 6. Haut |
| 2. Knochenmark | 7. drüsige Organe (Leber, Niere,
Milz, Nebenniere, Pankreas) |
| 3. Hoden | 8. Lunge |
| 4. Ovarien | 9. Zentralnervengewebe |
| 5. Schleimhaut des Magen-
Darmkanals | 10. Skelettmuskulatur |

Krebs und Leukämie nach Bestrahlung.

Als Spätschäden nach Röntgen- oder Radiumbestrahlung manifestieren sich vor allem die sogenannten Röntgenkarzinome und einige Arten von Leukämien. Eine Übersicht über die ersten 94 Fälle von Röntgenkarzinomen gibt Hesse (22). Karzinome treten auf bei langdauernder Einwirkung von kleinen Dosen vor allem bei Ärzten und Hilfspersonal, und ebenfalls nach kurzzeitigen therapeutischen Bestrahlungen. Sie entstehen nie auf gesunder Haut, sondern ausnahmslos auf dem Boden von wohlcharakterisierten Röntgenpräkanzerosen wie Hautatrophie, Rhagaden, Pigmentierung und Depigmentierung, Teleangiektasen und Hyperkeratosen (2).

Die Latenzzeit schwankt nach K. H. Bauer (2) zwischen 4 und 34 Jahren, nach R a j e w s k y (48) zwischen 7 und 25 Jahren. Beutel und Skopal (5) stellten an ihrem eigenen Krankengut eine Latenzzeit fest, die zwischen 6 und 23 Jahren variierte. Peterson (43) beobachtete eine Schwankungsbreite der Latenzzeit von 4 bis zu 42 Jahren. Nach Grützmaier (19) beträgt sie im Durchschnitt 17 Jahre.

Viele Arten von Krebs, besonders von Strahlenkrebs, entstehen nach Muller (34) durch Mutation somatischer Zellen. Gelegentlich kann in einer Zelle, die noch zu wiederholten Teilungen fähig ist, eine Veränderungen der Gene auftreten, die der Zelle die Fähigkeit zu einem extensiveren Wachstum verleiht, als sie die umgebenden normalen Zellen aufweisen. Die mutierten Zellen sprechen nicht mehr auf die hemmenden Einflüsse an, die im Organismus eine bestimmte Proportion der einzelnen Teile gewährleisten. Das hemmungslose Wachstum führt dann zu einem malignen Tumor, oder, wenn weiße Blutkörperchen betroffen werden, zu einer Leukämie. Muller (34) schreibt weiter: „Es liegen Gründe für die Annahme vor, daß viele, oder wohl die meisten Krebswachstumstypen eine ganze Serie von Mutationen erfordern, um die Zellen hinreichend weit vom Normalzustand entarten zu lassen. Es würde also in diesem Fall der Zeitfaktor eine Rolle spielen, sehr im Gegensatz zu dem, was wir in der normalen Mutationsauslösung beobachten.“

K. H. Bauer (2) sieht den Beweis für die Mutationstheorie der Geschwulstentstehung dadurch erbracht, daß die Noxen, die auf die Keimzellen mutationsauslösend wirken, in den somatischen Zellen

Krebs erzeugen und umgekehrt krebserzeugende Noxen, die auf Keimzellen eingewirkt haben, Mutationen hervorrufen. „Diese und viele andere Parallelitäten rechtfertigen den Schluß, daß der der Mutationsauslösung in Keimzellen und der der Kanzerisierung in Körperzellen zu Grunde liegende Vorgang wesensidentisch sein muß, daß also die Karzinogenese zellbiologisch eine Mutation somatischer Zellen im Bereich der wachstumregulierenden Erbstrukturen darstellt (2).“

Nach Schubert (55) sind für die Krebsentstehung nicht die Gene verantwortlich, sondern Plasmastrukturen, welche die Fähigkeit besitzen, sich immer wieder zu duplizieren. Durch die Einwirkung eines kanzerogenen Agens erfolgt eine Abänderung der Duplikanten, wobei dieses irreversible Ereignis mehrfach in der gleichen Zeit auftreten muß, um dann auf dem Wege über einen Summationseffekt zu einer Änderung in der Determination der Zelle zu führen. Dabei werden die planvoll hemmenden Regulationen des Wachstums und der Teilung beseitigt, es entsteht die Krebszelle mit einer erhöhten Wachstumstendenz und einer zeitlich abnormen Teilungsfunktion.

Auch die Leukämien werden vielfach als maligne Tumoren des blutbildenden Gewebes angesehen (Bauer (2), Tischendorf (61), Muller (34)). Die Ursachen sind die selben wie die der anderen bösartigen Tumoren. Das blutbildende Gewebe zeigt ebenfalls ein hemmungsloses Wachstum, das durch Mutation bestimmter wachstumsregulierender Erbstrukturen verursacht wird. Hueper (23), Henshaw (21) und Kaplan (26) konnten experimentell an weissen Mäusen beweisen, daß Leukämie durch Bestrahlung erzeugt werden kann. Einen Beweis dafür, daß Leukämie durch Bestrahlung auch beim Menschen erzeugt werden kann, erbrachten die Massensexperimente der Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki. Bei dem Personenkreis, der sich weniger als 2000 m vom Zielpunkt befand, zeigte sich nach 4 Jahren eine deutliche Erhöhung der Morbidität an Leukämie von 1,5 pro 100000 Einwohner auf 8,2 pro 100000 Einwohner (48). Durch mehrere Statistiken von March (30, 31) und Ulrich (63) ist ferner nachgewiesen worden, daß Röntgenärzte zehnmal häufiger an Leukämie erkrankten als andere Personenkreise.

Strahlenschäden nach Inkorporation radioaktiver Substanzen.

Nach Schubert und Höhne (56) besteht die größte Gefahr, die der Umgang mit radioaktiven Substanzen mit sich bringt, darin, daß versehentlich strahlendes Material in den Körper aufgenommen wird. Die Höhe der Dosis, die nach Inkorporation radioaktiver Substanzen den einzelnen Organen oder dem ganzen Körper appliziert wird, ist abhängig von folgenden physiologisch-chemischen Gege-

benheiten und den physikalischen Eigenschaften der radioaktiven Substanzen:

1. von der Art der emittierten Strahlung
2. von der Teilchen- bzw. Quantenenergie und ihrem absorbiertem Anteil
3. von der physikalischen Halbwertszeit
4. von der Art der Aufnahme in den Körper
5. von der Verteilung und Ablagerung im Organismus und der Ausscheidung (48).

Von toxischer Wirkung sind (nach Muth und Hug (36):

1. alle beta-strahlenden Isotope, welche sich in einzelnen Organen (besonders im Knochenmark) besonders stark anreichern und deren Halbwertszeit größer ist als einige Tage, in Mengen von mehr als 0,1 mC. Dazu gehören vor allem ^{14}C , ^{45}Ca , ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{144}Ce , ^{210}Bi .
2. alle beta-strahlenden Isotope in Mengen von mehr als 1 mC ohne Rücksicht auf ihre Halbwertszeit
3. alle gamma-strahlenden Isotope von mehr als 1 mg Gamma-Äquivalent zu Radium
4. alle alpha-strahlenden Isotope von weniger als 10^6 Jahren Halbwertszeit in jeder Menge, wenn sie in einer Form vorliegen, die Inkorporation ermöglicht.

Eine große Zahl von Strahlenschäden nach Inkorporation radioaktiver Substanzen sind bekannt geworden als der Strahlenkrebs der Joachimsthaler und Schneeberger Bergleute. Rostowski, Saupé und Schmohl (53) fanden bei 154 Bergleuten in Schneeberg in 62% der Fälle sicher, wahrscheinlich in 71% Lungenkrebs. Behounek und Fort (3) stellten bei 63 Obduktionen, die von 1929—1938 in Joachimsthal durchgeführt wurden in 45% der Fälle einen Lungenkrebs fest. Auslösende Ursache für den Schneeberger, bzw. Joachimsthaler Lungenkrebs ist die Radiumemanation, die von den Bergleuten während der Arbeit in den Gruben mit der Atmungsluft inhaliert wird. Den experimentellen Beweis dafür erbrachten Rajewsky, Schraub und Kahla (45).

Eine weitere Anzahl von Strahlungsschäden infolge von Inkorporation radioaktiver Substanzen wurde von Martland (33) beschrieben. Die Schäden traten auf bei amerikanischen Leuchtzifferblattmalerinnen. Die Inkorporation kam dadurch zustande, daß die Arbeiterinnen immer wieder die Pinsel mit den Lippen zuspitzten. Dadurch wurde der Farbstoff, der aus Zinksulfid bestand und als leuchtenden Bestandteil Radium, Mesothorium und Radiothor enthielt, in den Organismus aufgenommen. Die Arbeiterinnen erkrankten an Anämie, Nekrosen der Mandibula und osteogenen Sarkomen.

Weitere Fälle von akuten Vergiftungen und Spätschäden nach Inkorporation von Radium wurden von Bordier (8), Tönges und Kalbfleisch (62), Noorgard (41) und Rajewsky und Muth (46) beschrieben.

Präparate von Thorium X fanden als Röntgenkontrastmittel unter dem Namen Thorotrast oder Umbrathor in der Röntgendiagnostik eine ausgedehnte Verwendung. Eine Ausscheidung des inkorporierten Materials fand jedoch nicht statt, es wurde vielmehr im retikulo-endothelialen System gespeichert (Gebauer und Heinecker (13), Rof (52) und Randerath (50). Der Organismus ist an diesen Stellen einer dauernden Bestrahlung durch Alpha-, Beta- und Gammastrahlen ausgesetzt. Es entstehen entzündliche, stark verbackene, hochgradig hyperämische, operativ nicht radikal entfernbare Granulationstumoren (2). Außerdem an der Leber cirrhotische Prozesse (1). Von Schmidt, Schulte und Lapp (57), Gebbe (14), Meesen (35) und Struppler (59) wurden weitere Thorotrastschäden beschrieben.

V. Methoden der Strahlenschutzmessung

Zur Strahlenschutzmessung stehen uns vor allem folgende Methoden zur Verfügung:

1. Leuchtschirmmethode
2. Photographische Methode
3. Ionisationsmethode
4. Geiger-Müller Zählrohr.

Eine Standardmeßmethode gibt es nicht und damit auch kein Standardmeßgerät; bei einer Messung sollen Meßgeräte mindestens dreier verschiedener Typen zur Verfügung stehen (47).

Leuchtschirmmethode.

Der Grad der durch Röntgen- oder Gammastrahlen erzeugten Fluoreszenz eines Leuchtschirmes ist abhängig von der Intensität und Qualität der einfallenden Strahlung. Durch Vergleich mit Standardleuchtfarben kann man die Dosis der einfallenden Strahlung abschätzen. Nach diesem Prinzip arbeitet das Auerdosiskop (4). Die durch die starke Wellenlängenabhängigkeit hervorgerufene Fehlerquelle bleibt dabei unberücksichtigt.

Im Kryptometer von Eberhardt und Jaeger (10) wurde die Leuchtschirmmethode weiterentwickelt. Man vergleicht dabei die Helligkeit des Leuchtschirmes nicht mehr mit Standardleuchtfarben, sondern gleicht die Helligkeit einer Mattscheibe, die durch ein Photometerlämpchen erhellt wird, der Helligkeit des Leuchtschirmes an. Die Stromstärke der Photometerlampe ist ein Maß für die Dosis

der einfallenden Strahlung. Da die Helligkeit des Leuchtschirmes stark von der Wellenlänge der Strahlung abhängig ist, muß man die Qualität der Strahlung bestimmen können. Dies geschieht, indem man aus der Differenz der durch einen Filter abgeschwächten und der ungeschwächten Strahlung die Wellenlänge an Hand von Kurven bestimmt. Ist die Qualität der Strahlung bekannt, so kann man aus der entsprechenden Arbeitskurve die Dosisleistung direkt ablesen.

Nachteilig wirken sich aus: der kleine Meßbereich, beim Auerdosiskop sind nur bestimmte Grenzen anzugeben (4) und beim Kryptometer ist der Meßbereich von $0,5 \times 10^{-6}$ bis 5×10^{-5} r/sec (10), und die starke Wellenlängenabhängigkeit. Außerdem ergibt sich bei Ablesung derselben Dosis durch verschiedene Beobachter eine Differenz von 10–20% (10); die Fehlergrenze ist also verhältnismäßig weit.

Ein wesentlicher Vorteil ist die Möglichkeit der direkten Ablesung der Dosisleistung. Mit dem Auerdosiskop sind die Toleranzgrenzen im Raum leicht zu finden. Mit dem Kryptometer ist sogar die Möglichkeit geschaffen, außerhalb der Grenzwerte quantitative Angaben über die Dosis zu machen. Außerdem kann man in verdunkelten Räumen ohne Kryptoskop arbeiten und so an Stellen gelangen, die sonst unzugänglich sind. Lücken in den Strahlenschutzwänden lassen sich leicht finden, austretende schmale Bündel sind gut zu erkennen (10, 25, 47).

Im Wesentlichen ist die Leuchtschirmmethode nur zur orientierenden Raumüberprüfung geeignet (25).

Photographische Methode.

Die photographische Methode der Strahlenschutzmessung wurde in den letzten Jahren in Deutschland besonders von Wachsmann, Langendorff und Spiegler (27, 28) entwickelt und in größerem Umfang zur Strahlenschutzüberwachung eingesetzt.

Der Grad der Schwärzung eines photographischen Filmes ist abhängig von der Strahlenqualität und -quantität. Um aus der Schwärzung die Dosis bestimmen zu können, muß die Qualität der Strahlung bekannt sein. Die Wellenlängenabhängigkeit eines jeden Filmes wird zahlenmäßig ausgedrückt in dem Härtefaktor, das ist die Zahl, die angibt, wieviel r der Film bei einer bestimmten Härte mehr braucht, wie bei der am stärksten wirkenden Strahlenqualität, um dieselbe Schwärzung hervorzurufen. Die einfachste Methode zur Feststellung der Strahlenqualität ist nach Langendorff, Spiegler und Wachsmann (27) die Filtermethode mit einer geeigneten Filterkombination von 1,5 mm Al, 0,5 mm Cu und 0,5 mm Pb. Die Filter sind mit dem Film in einer Preßstoffkassette so angebracht, daß sich gleiche Filter gegenüber liegen und sich zwischen ihnen der Film befindet. Außerdem ist ein Feld ohne Filter vorhanden. Aus dem verschiedenen Grad der Schwärzung zwischen den einzelnen

Filtern läßt sich die Strahlenqualität schon roh abschätzen. Zur genaueren Analyse wurde folgendes Verfahren entwickelt (27): Man ermittelt aus der Schwärzungskurve des verwendeten Filmes die „scheinbare“ Dosis, das ist die Dosis, die die Filme getroffen hätte, wenn die Strahlung die für die Filmschwärzung optimale Qualität von etwa 80 kV gehabt hätte. Aus den so gefundenen Werten wird dann das Verhältnis der „scheinbaren“ Dosis des Feldes ohne Filter zu der „scheinbaren“ Dosis des Feldes hinter dem Filter, hinter dem sich gerade noch Schwärzungen feststellen lassen, das ist bei weicher Strahlung das Al Feld, bei mittel-harter das Cu Feld und bei harter das Pb Feld, gebildet. Das so gefundene Dosisverhältnis gestattet unter Verwendung eines für den Film ermittelten Diagrammes die Härte der Strahlung, die den Film getroffen hat, und gleichzeitig auch den dazugehörigen Härtefaktor herauszulesen. Durch Multiplikation mit dem Härtefaktor erhält man aus der „scheinbaren“ Dosis des Feldes ohne Filter die wahre Dosis.

Die Schwärzung des Filmes wird mit einem photoelektrischen Schwärzungsmesser, der mit einer Seelenzelle versehen ist, ermittelt.

Da die Feststellung des Härtefaktors nach der Filtermethode mit einem Meßfehler behaftet ist, wegen des Rückganges des latenten Bildes, wegen des Einflusses des Einfallswinkels und der ungenauen Ergebnisse bei sehr heterogener Strahlung, soll das gefundene Ergebnis mit dem Faktor 1,25 multipliziert werden. Die so gefundenen Ergebnisse seien für die Strahlenschutzmessung genügend genau (27).

Die Filmschwärzungsmethode ist besonders gut geeignet zur laufenden Überwachung des Personals (27) und zur Ermittlung der Wochen- und Monatsdosis (25), da auch kleinste Dosen summiert werden. Die Filme können ohne Behinderung während der Arbeit getragen werden (27), z.B. am Rockaufschlag oder sogar am Finger (51). Von Nachteil ist die starke Wellenlängenabhängigkeit und die damit verbundene Ungenauigkeit der Meßergebnisse, deren Ermittlung erst nachträglich und mit einem verhältnismäßig komplizierten Verfahren — Entwicklung des Filmes, Bestimmung der Schwärzung, Errechnung des Härtefaktors — stattfinden kann (25, 27, 47).

Ionisationsmethode.

Die Definition der Röntgeneinheit beruht auf der Ionisation der Luft durch Röntgen- und Gamma-, sowie der Alpha- und Betastrahlen. Deshalb arbeiten die meisten Meßgeräte, die eine genaue wellenlängenunabhängige Ermittlung der Dosis ermöglichen, nach dem Prinzip der Messung der Luftionisation.

Die einfachste Ionisationskammer besteht aus einem elektrisch leitenden, strahlendurchlässigen Zylinder, in dem sich ein ebenfalls elektrisch leitender Stift befindet, der durch ein Dielektrikum gegen den Zylinder isoliert ist. An die Kammerwand bzw. den Stift wird

der Pol einer Gleichstromquelle angeschlossen. Wird nun die Luft in der Kammer ionisiert, so werden die Ionen einen Elektrizitäts-transport zwischen der Kammerwand und dem Stift bewirken. Es fließt ein elektrischer Strom, der allerdings sehr klein ist. Wenn die Dosis 10 r/min beträgt und das Volumen der Kammer 2 ccm ist, so ist die Stromstärke 1×10^{-10} Ampère (44). Mit einem Fadengalvanometer ist dieser Strom meßbar, jedoch ist der Gebrauch eines solchen Instrumentes so umständlich, daß man einen Weg finden mußte, den Spannungsabfall zu erhöhen. Nach dem Ohm'schen Gesetz ist $U = I \times R$. Erhöht man den Widerstand R auf 10^{11} Ohm, dann ist der Spannungsabfall $U = 10^{-10} \times 10^{11}$ Volt = 10 Volt. Eine solche Spannung ist bequem meßbar. Allerdings muß der Widerstand des Instrumentes bedeutend höher sein als der Widerstand, der zur Erhöhung des Spannungsabfalls dient. Es kommt also nur eine Elektrometerrohre oder ein Elektrometer in Frage.

Da der Ausschlag dieser Instrumente direkt proportional dem Ionisationsstrom ist, zeigen sie unmittelbar die Dosis in r pro Zeiteinheit an. Die Instrumente, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind also Dosisleistungsmesser. Bei konstanter Dosisleistung kann man die Dosis aus dem Produkt der Dosis pro Zeiteinheit und der Zeit ermitteln. Bei inkonstanter Dosisleistung muß zur Bestimmung ein Durchschnittswert ermittelt werden.

An Stelle des Widerstandes kann man auch einen Kondensator einschalten. Er wird dann durch den durch die Kammer fließenden Strom aufgeladen. Die Spannung am Kondensator ist dann direkt proportional dem Produkt aus Strom und Zeit. Das Instrument ist also ein Dosismesser im eigentlichen Sinn. Bei einer Einstrahlung von 1 r entsteht bei einem Kondensator von 1 ccm Volumen und 1 cm Kapazität eine Spannung von 300 Volt (44).

Anstatt einen Kondensator aufzuladen, kann man auch einen vorher aufgeladenen Kondensator durch den Ionisationsstrom entladen lassen. Anfangs zeigt das Elektrometer die volle Batteriespannung an. Durch den Ionisationsstrom wird allmählich der Kondensator entladen, was an dem Elektrometer abgelesen werden kann. Die Differenz der Ladungen ist direkt proportional dem Ionisationsstrom. Das Instrument ist ebenfalls ein Dosismesser. Es kann zur Dosisleistung benutzt werden, wenn man die Zeit für die Entladung mißt.

Durch die energiereichen Strahlen werden in 1 ccm Luft der Ionisationskammer pro r $2,08 \times 10^9$ Ionenpaare gebildet. Damit eine Rekombination der Ionen vermieden und somit eine zu geringe Dosis gemessen wird, muß die Spannung zwischen der Kammerwand und der Innenelektrode so hoch sein, daß alle Ionen an die beiden Elektroden wandern. Die gebildeten Ionen müssen außerdem so schnell getrennt werden, daß sie keine Zeit zur Rekombination finden. Es

kommt also auch auf die Gestaltung der Elektroden an. Damit hat jede Kammer ihre eigene Sättigungsspannung. In den Eichkurven der Dosimeter ist daher eine Angabe über die höchste Dosisleistung bei der noch mit Sicherheit Sättigungsspannung vorhanden ist.

Die meisten Dosimeter besitzen eine Radiumkontrolle. Der Sinn der Radiumkontrolle besteht darin, eine normalisierte Strahlung auf die Kammer einwirken zu lassen um zu prüfen, wie das gesamte Meßinstrument darauf reagiert. Zur Radiumkontrolle dürfen nur Beta-Strahlen verwendet werden, da die Gamma-Strahlen wegen ihrer Durchdringungsfähigkeit das gesamte Meßsystem beeinflussen würden.

Die Meßgeräte mit Großkammern sind sehr gut geeignet zur Messung der Ortsdosis oder zur Bestimmung der Isodosen. Vorteilhaft ist die meist zahlenmäßige, direkte und wellenlängenunabhängige Angabe der Dosis. Das Kondiometer, bei dem die Ionisationskammer, die relativ klein ist, und getrennt vom Meßinstrument getragen werden kann, besitzt die gleichen Vorteile wie die Filmschwärzungsmethode; es ist dazu noch wellenlängenunabhängig und ermöglicht genauere Messungen, die verhältnismäßig leicht auszuwerten sind.

Über die Vielzahl der Instrumente mag eine Zusammenfassung von P y c h l a u (44), die durch das Instrument von F r a n k (12) ergänzt wurde, eine Übersicht geben.

Besonders zu erwähnen ist das Kondiometer der Physikalisch-Technischen-Werkstätten in Freiburg (PTW). Die kleine Ionisationskammer wird gleichzeitig als Kondensator benutzt. Nach Aufladung durch das Instrument kann sie unabhängig von diesem getragen und der Strahlung ausgesetzt werden.

Bei allen anderen Instrumenten sind die Ionisationskammern durch ein Kabel mit dem Instrument verbunden.

Geiger-Müller Zählrohr

Das Geiger-Müller Zählrohr (11) besteht aus dem eigentlichen Zählrohr, dem Empfänger der Strahlung, und dem Meßgerät, mit dem die vom Zählrohr abgegebenen Impulse gezählt und verstärkt werden. Das Zählrohr ist eine Gasentladungsröhre, die den Zweck hat, kleine geladene Partikelchen und die Energiequanten der Röntgen- und Gammastrahlen nachzuweisen. Es besteht aus einer zylinderförmigen Kathode und einer axialen Anode. Im Innern ist ein mäßiges Vakuum von ca. 70 mm Hg. Bei niedriger Spannung arbeitet das Zählrohr wie eine Ionisationskammer. Bei steigender Spannung erreicht man den sogenannten Geiger-Müller Bereich, es kommt zum Ionenstoß. Der Geiger-Müller Bereich liegt bei ca. 13000 Volt (11). Das primäre Elektron bildet durch Stoß neue Elektronen, die wiederum weitere erzeugen. Die Größe der Impulse

Tabelle 3

Zusammenfassung der Dosimeter
nach Pychlau (44) ergänzt durch das
Standarddosimeter nach Frank (12)

Instrument	Beobachtete Größe	Art der Beobachtung	Ermittlung der r/min oder r	Prinzip	Radiumkontrolle	Messung während der Kontrolle
Siemens Universal Dosimeter	r/min oder r	Ablesung an Skala	direkt	Spannungsabfall oder Aufladung	zuge- schaltetes Strom- normal	ja
Berthold Polidosi- meter	r/min	Ablesung an Skala	direkt	Span- nungs- abfall	zugeschal- tetes Strom- material	ja
Victoreen Ionometer	Teil- striche	Ablesung an Skala	Tabelle	Spannungs abfall	ohne	ja
Küstner Eichstand- gerät	Skalen- Teil- differenz	Mikroskop- ablesung	Rechnung od. Nomo- gramm	Entla- dung	Beta- strahlena. Kammer	nein
Küstner Panzerdosi- meter	Skalen- Teil- differenz	Mikroskop- ablesung	Rechnung od. Nomo- gramm	Entla- dung	Beta- strahlena. System	nein
Ionognom	10 r	automatische Zeitermitt- lung	Tabelle	Aufla- dung	Beta- strahlena. System	nein
Hammer- dosimeter	r/min . oder r	Ablesung an Skala	direkt	Entla- dung	Betastrahlen auf System	ja
Victoreen Kondensator Dosimeter	r	Ablesung an Mikroskop- skala	direkt	Entla- dung	ohne	in Teil- dosen
Kondiometer	Skalen- teil- differenz	Ablesung an Lichtzeiger- skala	Rechnung	Entla- dung	ohne	in Teil- dosen
Standard- dosimeter nach Frank (12)	r	Ablesung an Mikroskop- skala	direkt	Aufla- dung	ja	ja

ist in diesem Bereich unabhängig von der Zahl der Ionen, die im Augenblick der Primärionisation entstehen. Sie ist damit unabhängig davon, ob der Impuls durch Alpha-, Beta-, Gamma- oder Röntgenstrahlen ausgelöst wird. Da die Betastrahlen nur eine geringe Durchdringungsfähigkeit besitzen, sind in Zählrohren, die zur Messung von Betastrahlen dienen, Fenster eingebaut, die diese ins Kammerinnere eindringen lassen.

Zwei Impulse können nur dann getrennt werden, wenn zwischen ihnen der Stromdurchgang des Zählrohres gelöscht wird, und der Zählrohrdraht wieder sein Ruhepotential annehmen kann. Die Zeit, die dazu nötig ist, beträgt 10^{-2} sec; die sogenannten selbstlöschenden Geräte mit einer Alkoholdampffüllung benötigen nur 10^{-6} sec (11).

Da das mechanische Zählwerk in einer bestimmten Zeit nur eine begrenzte Zahl von Impulsen registrieren kann, sind die Geräte so eingerichtet, daß z. B. nur jeder 4. oder 8. Impuls gezählt wird. Die geladenen Partikelchen oder Energiequanten gelangen nicht in einem bestimmten zeitlichen Abstand in das Zählrohr, sondern folgen teilweise sehr dicht aufeinander; daher ist das Auflösungsvermögen schon viel eher erreicht. Aus diesem Grunde erhält man bei der Dosierung desselben Radiumpräparates voneinander abweichende Werte, wenn die Messungen nur in einem kurzen Zeitraum vorgenommen werden. Erst wenn sich die Messungen über einen längeren Zeitraum erstrecken, erhält man übereinstimmende Werte. Die meisten Zählrohrgeräte besitzen zur Eichkontrolle ein Standardradiumpräparat.

Die Geiger-Müller Zählrohre haben eine außerordentlich große Empfindlichkeit. Jedoch läßt die Meßgenauigkeit bei sehr kleinen Dosen nach. Vorteilhaft ist die schnelle und direkte Angabe der Dosisleistung. Nach Rajewsky und Jaeger (47) sollten Zählrohrgeräte vorwiegend als Kontroll- und Warngeräte benutzt werden.

VI. Ergebnisse der Strahlenschutzmessung

Aufgabe des Strahlenschutzes muß es sein, die ungewollte Strahlung des Personals so gering wie nur eben möglich zu halten (25). Dabei ist am wichtigsten der Schutz gegen die Gammastrahlen. Er wird gewährt durch Einschaltung von Schutzwänden aus schweratomigen Materialien zwischen Strahlungsquelle und Körper des Personals, z. B. durch die Bleiwände des Radiumtresors oder durch das Bleiglas, das sich am Arbeitstisch zwischen der radioaktiven Substanz und dem Körper des Arbeitenden befindet. Die Alpha-Strahlen bilden keine große Gefahrenquelle, da ihre Reichweite im Gewebe c. 50 Mikron beträgt und die Partikelchen die obere Hornschicht der Haut also nicht durchdringen. Auch weiche Beta-Strahlen sind nicht sehr gefährlich, da sie durch die Hornlamellen der Haut abgeschwächt werden. (37). Außerdem werden die Beta-Strahlen schon durch die Wandungen eines üblichen Glasgefäßes weitgehend absorbiert (24). Jedoch führt chronische Einwirkung, auch kleiner Dosen, von Beta-Strahlen zu den als Röntgendermatitis bekannten Veränderungen der Haut. Deswegen müssen intensive Verschmutzungen der Haut mit radioaktiven Substanzen sofort erkannt und beseitigt werden. Bei der Handhabung solcher radioaktiver Sub-

stanzen sind langstielige Faßinstrumente zu benutzen, die die Abstandseinhaltung der Hände aus dem Bereich der stärksten Strahlung garantieren (17, 37).

Von wesentlicher Bedeutung für den gesamten Strahlenschutz ist die Strahlenschutzmessung, weil nur sie rechtzeitigen Aufschluß geben kann über die Höhe der Strahlenbelastung, der das Personal ausgesetzt ist. Die durchschnittliche Belastung von Personenkreisen, die bei der beruflichen Tätigkeit in den Einflußbereich ionisierender Strahlen gelangen, ist durch Messungen festzustellen, die in größerem Umfange durchzuführen sind und über einen größeren Zeitraum sich zu erstrecken haben. Aus den Ergebnissen lassen sich Rückschlüsse ziehen auf die Güte des mechanischen Strahlenschutzes und die Anwendung von Arbeitsmethoden, die eine größere Strahlenbelastung der einzelnen Personen ausschließen. Solche Messungen wurden in Deutschland durchgeführt von Dresel (9) und Langendorff und Wachsmann (28), die die Strahlenbelastung von etwa 350 Personen überwachten. Die Überwachungen dieser Autoren erstreckten sich über mehrere Monate. Die Wochendosis wurde mit Filmplaketten ermittelt, die jeweils einen Monat getragen und dann an einer zentralen Stelle ausgewertet wurden.

In den USA wurden entsprechende Messungen ebenfalls in Röntgen- und Radiumbetrieben von Spalding, Deamicis und Cowing (58) durchgeführt. Zur Überwachung bediente man sich Filmplaketten, die eine Woche getragen und dann ausgewertet wurden. Die Zahl der in der Zeit vom 1. I. 1950 bis zum 31. XII. 1952 überwachten Personen betrug allein in Radiumbetrieben 580, insgesamt etwa 850 Personen.

Greening (18) führte in England ähnliche Untersuchungen an 944 Ärzten, Physikern und Angestellten durch.

Tabelle 4

Strahlenschutzmessungen an ca. 350 Personen in Röntgen- und Radiumbetrieben (Langendorff und Wachsmann (28))
Es erhielten:

0 —0,05 r/Woche	79,80 %
0,05—0,25 r/Woche	13,00 %
0,25—0,5 r/Woche	3,20 %
0,5 —1,0 r/Woche	2,38 %
1,0 —2,0 r/Woche	0,61 %
mehr als 2,0 r/Woche	1,01 %

Tabelle 5

Strahlenschutzmessungen an ca. 850 Personen in Röntgen- und Radiumbetrieben (um eine bessere Vergleichsmöglichkeit zu erhalten, sind die Ergebnisse von Spalding, Deamicis und Cowing (58) aus den Tabellen 6, 7, und 8 zusammengefaßt wiedergegeben).

Es erhielten:

0	—0,05 r/Woche	89,13 %
0,05—0,10	r/Woche	8,30 %
0,10—0,20	r/Woche	1,86 %
0,20—0,30	r/Woche	0,49 %
mehr als 0,3	r/Woche	0,22 %

Aus dem Vergleich der Tabellen 4 und 5 geht hervor, daß in Deutschland die Strahlenbelastung des Personals erheblich höher ist als in den USA. Während Überschreitungen der Dosis von 0,3 r/Woche in der Tabelle 5, die die Ergebnisse der Messungen in den USA wiedergibt, nur bei einem Prozentsatz von 0,22 auftreten, ist dieses in Deutschland bei etwa 7% der Fall (Tabelle 4). Auch wenn die Ergebnisse von Spalding, Deamicis und Cowing (58) einerseits und Langendorff und Wachsmann (28) andererseits nicht bei genau den gleichen Personenkreisen durchgeführt sein sollten, die Ergebnisse also nicht ohne Vorbehalte verglichen werden könnten, ist doch die Strahlenbelastung des Personals in Deutschland im Vergleich zu der Belastung des Personals in USA sehr hoch.

Nach Strahlenschutzmessungen von Greening (18) in England an 944 Personen erhielten 60% der Überwachten weniger als 0,05 r/Woche und 82% weniger als 0,1 r/Woche.

Tabelle 6

Strahlenschutzmessungen in Röntgenbetrieben
(Spalding, Deamicis und Cowing (58))

	1950		1951		1952	
Zahl der Filme	3747		4051		4427	
Zahl der Personen	83		93		99	
r/Woche	Filme	%	Filme	%	Filme	%
0 —0,05	2754	73,7	2607	64,1	2600	58,7
0,05—0,1	763	20,2	1128	28,0	1418	32,0
0,1 —0,2	168	4,5	237	5,9	311	7,0
0,2 —0,3	46	1,2	56	1,4	69	1,6
mehr als 0,3	16	0,4	23	0,6	29	0,7

Tabelle 7

Strahlenschutzmessungen in Isotopenlaboratorien
(Spalding, Deamicis und Cowing (58))

	1950		1951		1952	
Zahl der Filme	8520		10136		10291	
Zahl der Personen	163		196		221	
r/Woche	Filme	%	Filme	%	Filme	%
0 —0,05	8494	99,70	10090	99,54	10234	99,43
0,05—0,1	13	0,15	24	0,24	27	0,27
0,1 —0,2	4	0,05	9	0,09	11	0,11
0,2 —0,3	3	0,03	7	0,07	8	0,08
mehr als 0,3	6	0,07	6	0,06	11	0,11

Tabelle 8

Strahlenschutzmessungen bei Krankenpflegerinnen
(Spalding, Deamicis und Cowing (58))

	1951		1952	
Zahl der Filme	65		173	
r/Woche	Filme	%	Filme	%
0 —0,05	41	63	89	51,5
0,05—0,1	13	20	49	28,5
0,1 —0,2	8	12	23	13,0
0,2 —0,3	3	5	12	7,0
mehr als 0,3	0	0	0	0,0

Von großem Interesse ist die Frage, welche Personenkreise einer stärkeren Strahlenbelastung ausgesetzt sind, die in den Radiumbetrieben Arbeitenden oder die in den Röntgenbetrieben Arbeitenden. Die Messungen von Langendorff und Wachsmann (28) ergaben, daß in Radiumbetrieben von 18,8% der überwachten Personen die Toleranzdosis von 0,5 r/Woche überschritten wurden, während es in Röntgenbetrieben zu Überschreitungen nur in 2,45% kam. Zu fast den gleichen Ergebnissen führten Messungen von Dresel (9), die in Tabelle 9 wiedergegeben sind.

Tabelle 9

Überschreitungen der Toleranzdosis in Röntgen- und Radiumbetrieben (Dresel (9))

Zeitraum	1. III. 52—31. III. 53	1. V. 53—31. XII. 54	1. I. 55—31. XII. 55
Röntgenbetriebe	2,7 %	2,3 %	1,5 %
Zahl der Filme	1500	8000	7000
Radiumbetriebe	16,3 %	12,2 %	11,9 %
Zahl der Filme	250	1200	2500

Die Ergebnisse der Strahlenschutzüberwachung von Spalding, Deamicis und Cowing (58) führten zu völlig anderen Ergebnissen, wie aus den Tabellen 6 und 7 hervorgeht. In den Röntgenbetrieben wurde die Dosis von 0,3 r/Woche von 0,56% die überwachten Personen überschritten, während es in den Radiumbetrieben nur 0,08% waren.

In diesem Zusammenhang sei auch auf den erzieherischen Wert der laufenden Strahlenschutzüberwachung hingewiesen. In Tabelle 9 ist ein wesentlicher Rückgang in der Zahl der Überschreitungen der Toleranzdosis festzustellen. Der geschwärzte Film einer ordnungsgemäß getragenen Plakette liefert nicht nur einen Anhaltspunkt für die Ortsdosen an den Arbeitsplätzen, sondern läßt bei bekannter Ortsdosen auch Schlüsse auf eventuell leichtsinniges Verhalten gegenüber Strahlen zu (9).

Nicht nur die unmittelbar mit radioaktiven Substanzen arbeitenden Personen sind gefährdet, sondern auch die Pfleger und Pflegerinnen, die die mit radioaktiven Substanzen versehenen Patienten betreuen. Nach Langendorff und Wachsmann (28) erhielt z. B. ein Pfleger in einer chirurgischen Klinik in 5 Monaten folgende Wochendosen: 7,5 r, 4,0 r, 0,2 r, 0,6 r und 2,4 r; im Durchschnitt also die Dosis von 2,95 r/Woche. Tabelle 8 zeigt die genaueren Ergebnisse der Strahlenschutzüberwachung an Krankenpflegerinnen, welche Patienten betreuten denen 50 bis 150 mC ^{131}J oder kolloidalem ^{198}Au appliziert worden war (58).

Von vielen Personen, die beruflich den Einwirkungen ionisierender Strahlen über einen größeren Zeitraum ausgesetzt sind, scheinen die Gefahren einer erhöhten Strahlenbelastung nicht genügend bekannt oder beachtet worden zu sein, oder es fehlt an den nötigen Strahlenschutzmaßnahmen. Das geht einmal aus den häufigen Überschreitungen der Toleranzdosis, besonders in Radiumbetrieben, und zum anderen aus folgenden Einzelbeispielen hervor, bei denen die verabfolgten Strahlenmengen häufig ein Vielfaches der Toleranzdosis betragen: Ein Arzt, der mit ^{60}Co arbeitete erhielt während 9 Monaten folgende Wochendosen: 0,65r, 0,9 r, 1,2 r, 1,4 r, 1,2 r, 1,7 r, 4,0 r und 0,5 r, im Durchschnitt also 1,4 r (28). In Tabelle 12 erhielten zwei Radiumschwestern über 6 Monate eine durchschnittliche Wochendosis von 21 bzw. 6,7 r (28). Weitere Beispiele zeigen die Messungen an dem oben schon erwähnten Krankenpfleger und die Tabellen 11 und 13. Langendorff und Wachsmann (28) stellten in ihren Untersuchungen fest, daß von 51 Personen, bei denen die Überschreitungen der Toleranzdosis von 0,5 r pro Woche festgestellt wurden, diese allerdings nur bei 9 Personen regelmäßig auftraten.

Eine Veröffentlichung, die einen Einblick gibt, über die Arbeit in einem amerikanischen Isotopenlaboratorium und die Strahlenbela-

stung der dort beschäftigten Personen, gaben Geist, Glasser und Hughes (15) heraus.

1. Zwei Radiologen, die wöchentlich im Durchschnitt 30 Patienten mit radioaktivem Jod und 5 mit radioaktivem Phosphor behandeln, erhalten 0,08 r/Woche.
2. Drei Assistenten, die Radon von einer Menge von 350 mg Radium abfüllen, erhalten durchschnittlich 0,21 r/Woche, teilweise sogar bis zu 0,300 r. Die Arbeit wurde daraufhin abgebrochen und die Anlage überprüft.
3. Ärzte, die Applikatoren mit 50 mg Radium anlegen (ca. 10 Patienten pro Woche), erhalten 0,63 r/Woche.
4. Ophthalmologen, die Radium D und Strontium 90 applizieren, erhalten eine solch geringe Dosis, daß der Film keine Schwärzung zeigt.
5. Der Leiter der biophysikalischen Abteilung mit seinen Assistenten, deren Arbeit in der Überprüfung der Röntgenanlagen, Dosierung und Füllung der Radiumapplikatoren und Messung der Aktivität des Blutes zur Diagnostik besteht, erhalten durchschnittlich 0,01 r/Woche.

Vollständig läßt sich eine Strahlenbelastung bei der Arbeit mit radioaktiven Substanzen nie ausschließen. Immer gelangt die arbeitende Person in eine solche Nähe zur radioaktiven Substanz, daß eine Einwirkung in Frage kommt, z. B. bei der Entnahme aus dem Tresor und Beförderung zum Arbeitstisch, beim Beladen und Sterilisieren der Applikatoren, beim Ein- bzw. Auflegen und der Entnahme beim Patienten, beim Entladen und Reinigen der Applikatoren und dem Einlegen der radioaktiven Substanz in den Tresor (17). Aber bei all diesen Arbeiten hängt die Größe der Strahlenbelastung in weitestem Ausmaße von der Arbeitsmethode des betreffenden Radiologen bzw. der betreffenden Radiumschwester ab. Eine Messung von Zimmer (64) zeigt, wie man die Bestrahlung durch Vorsichtsmaßnahmen erheblich herabsetzen kann.

Tabelle 10

Strahlenschutzmessung beim Transport einer Moulage (80 mg Ra) innerhalb der Klinik vom Tresor zum Patienten (Zimmer (64).

Beförderungsweise	Dosis am rechten Handrücken
Tragen in der rechten Hand	
nach Einwickeln in Bleigummi	0,36 r
Fahren in ungepanzertem Wagen	
mit 1 m langer Deichsel	0,00 r

Es gelang also, nur durch Wahrung eines Abstandes von 1 m von der Strahlenquelle, die Höhe der Dosis auf ein Minimum herabzusetzen.

Im Folgenden sind Strahlenschutzmessungen von Jaeger (25) und Langendorff und Wachsmann (28) angeführt. Aus beiden Tabellen geht hervor, wie sehr die Tages- bzw. Wochendosen bei Personen, die genau dieselbe Tätigkeit ausüben, differieren. Die Ursache für diese starken Differenzen kann nur in der Arbeitsmethode der überwachten Personen zu suchen sein. Die Höhe der verabfolgten Dosen liegen zwar immer noch weit über der Toleranzdosis, aber immerhin wurden sie auf die Hälfte bzw. ein Drittel herabgesetzt.

Tabelle 11

Strahlenschutzmessungen bei zwei mit der Konzentrierung von radioaktiven Stoffen beschäftigten Chemikerinnen (Jaeger (25).

Datum	Versuchsperson I obere Kitteltasche r/Tag	Versuchsperson II obere Kitteltasche r/Tag
16. VIII.	1,1	0,42
17. VIII.	1,1	0,15
18. VIII.	0,7	—
19. VIII.	1,0	0,07
20. VIII.	0,9	1,1
Mittlere Tagesdosis	0,96 r	0,43 r

Tabelle 12

Wöchentliche Dosen zweier Radiumschwestern in 6 aufeinanderfolgenden Überwachungsperioden von je einem Monat (Langendorff und Wachsmann (28).

Monat	Radiumschwester I r/Woche	Die sie ablösende Schwester II bei der gleichen Tätigkeit r/Woche
1	15	0,5
2	50	1,3
3	20	2,3
4	40	10
5	0,6	1,0
6	0,8	2,5
Mittlere Wochen- dosis	21 r	6,7 r

Auch wenn noch so vorsichtig mit langstieligen Faßinstrumenten gearbeitet wird, gelangen immer die Hände in den Bereich der stärksten Strahlung. So wiesen z.B. von 152 nordamerikanischen Radiologen 48% anormale Fingerabdrücke auf und 138 von 152 be-

saßen anormale Hautkapillaren am Fingerfalz (zitiert bei Muth und Hug (37), Veränderungen, die nur durch die Einwirkung der ionisierenden Strahlung hervorgerufen werden konnten. Eine Meßreihe von Zimmer (64) ergibt, daß die rechte Hand der überwachenden Schwester im Mittel ca. dreimal so stark bestrahlt wird wie der Körper.

Tabelle 13

Meßreihe an einer Schwester, die mit der Vorbereitung von Radiumapplikatoren, Füllung von Radiumpräparaten und Bau von Moulagen beschäftigt ist. Ra Bestand 1000 mg. (Zimmer (64))

Datum	linke untere Kitteltasche	rechter Handrücken
19—21	0,35 r/d	0,96 r/d
21—23	0,16 r/d	0,78 r/d
26—27	0,57 r/d +	1,15 r/d
27—29	0,45 r/d +	1,23 r/d +
29—30	0,90 r/d +	1,54 r/d
2— 4	0,18 r/d	0,54 r/d
4— 6	0,14 r/d	0,70 r/d
9—11	0,16 r/d	1,22 r/d
11—12	0,13 r/d	1,47 r/d
12—14	0,15 r/d	0,55 r/d
Mittelwert	0,319 r/d	1,014 r/d

(+ bedeutet: höheren Wert als die angegebene Dosis da die Kondensatorkammer vollständig entladen war.)

Von Robb und Ellis (51) wurden genauere Messungen an den Fingern und Händen bei der Applikation von Radiumpräparaten und bei verschiedenen Radiummanipulationen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

Tabelle 14

Strahlenschutzmessung bei der Applikation von Radiumpräparaten in 133 gynäkologischen Fällen (Robb und Ellis (51)).

Rechte Hand	Mittlere Dosis r/Operation	Linke Hand	Mittlere Dosis r/Operation
Daumen	0,15	Daumen	0,19
Zeigefinger	0,09	Zeigefinger	0,16
Mittelfinger	0,13	Mittelfinger	0,24

Die mittlere Dosis an jedem Finger betrug bei 133 Beobachtungen 0,16 r/Operation.

Eigene Messungen

Eine vollständige Abschirmung der Strahlen durch mechanische Schutzmaßnahmen ist nie zu erreichen. Aus diesem Grund ist es

wichtig, die Dosisleistung für den jeweiligen Arbeitsplatz zu wissen und damit die Stellen im Arbeitsraum zu kennen, an denen bei längerem Aufenthalt die Strahlenbelastung so groß wird, daß die Toleranzdosis erreicht oder überschritten wird. Wenn man diese Stellen kennt, kann es nicht schwer sein, einen längeren Aufenthalt im Bereich der intensivsten Bestrahlung zu vermeiden. Gefahrenquellen sind vor allem der Tresor, in dem die radioaktiven Substanzen aufbewahrt werden und der Verpackungstisch, auf welchem die Radiumpräparate fertiggestellt werden. Dies zeigen die folgenden eigenen Messungen am Strahlentresor und Verpackungstisch, die in der Strahlenabteilung der Universitätsklinik für Haut und Geschlechtskrankheiten Würzburg durchgeführt wurden.

Tabelle 15

Strahlenschutzmessung am Radiumtresor

Inhalt des Tresors: 50 g Plastobalt und 50 mg Radium

Abstand vom Tresor	Dosisleistung
Direkt vor dem Tresor, in Höhe des äußeren Schlüsseloches	0,1 r/h
50 cm, in Höhe des äußeren Schlüsseloches	0,50 mr/h
Direkt vor dem Tresor, nach Abdeckung des Schlüsseloches durch eine Bleischicht von 2 mm	0,1 r/h
An der seitlichen Einfassung des Tresors	0,02 r/h
Unterhalb des Mauersockels	0,1 r/h 5—7 mr/h
85 cm, an der Rückseite des Tresors im Gang	0,05r/h

Tabelle 16

Strahlenschutzmessung am Verpackungstisch

50 g Plastobalt und 50 mg Radium

Abstand vom Verpackungstisch	Dosisleistung
An der Schutzseite des Verpackungstisches, an der Außenseite	0,5 r/h
An der Außenseite der Bleiglasscheibe	mehr als 1 r/h
Unter dem Tisch, unmittelbar im Kontakt mit der Abschlußplatte	mehr als 1 r/h
1 m vom Tisch	0,02 r/h

Tabelle 17
Strahlenschutzmessung am Verpackungstisch
50 mg Radium

Abstand vom Verpackungstisch	Dosisleistung
An der Schutzseite des Verpackungstisches, an der Außenseite	0,15 r/h
An der Außenseite der Bleiglasscheibe	0,1 r/h
Unter dem Tisch, unmittelbar im Kontakt mit der Abschlußplatte	0,3 r/h
1 m vom Tisch	3 mr/h

Die Messungen in Tabellen 15, 16 und 17 wurden mit dem Radiameter F H 40 der Herstellerfirma Friesecke & Hoepfner durchgeführt.

Zusammenfassung

Durch die Verwendung ionisierender Strahlen in Medizin, Forschung und Technik kommt es in den zivilisierten Ländern zu einer erhöhten Strahlenbelastung der Bevölkerung. Diese beträgt ca. 25% der natürlichen Strahlenbelastung.

Die höchstzulässige Dosis für die Einwirkung ionisierender Strahlen über eine unbegrenzte Zeit auf den ganzen Körper beträgt nach den Empfehlungen der Internationalen Kommission für Strahlenschutz 0,3 r/Woche bzw. 0,3 rem/Woche. Eine Toleranzdosis für die Schädigung genetischen Materials existiert nicht, die Strahlenbelastung soll so gering wie nur eben möglich gehalten werden.

Spätschädigungen nach Einwirkung ionisierender Strahlen manifestieren sich vor allem als Karzinome, Sarkome und Leukämien. Als Ursache wird eine Mutation wachstumsregulierender Erbstrukturen in den somatischen Zellen angesehen.

Folgende Methoden der Strahlenschutzmessung werden erörtert:

1. Leuchtschirmmethode
2. Photographische Methode
3. Ionisationsmethode
4. Geiger-Müller Zählrohr

Strahlenschutzmessungen, sowohl an größeren Personenkreisen, als auch an einzelnen Personen oder Strahlungsquellen, vermittelten folgende Ergebnisse:

1. Die Zahl der Überschreitungen der Toleranzdosis von 0,5 r/Woche ist in Radiumbetrieben ca. 7 mal größer als in Röntgenbetrieben.
2. Die Strahlenbelastung des Personals in Röntgen- und Radiumbetrieben ist in Deutschland bedeutend höher als in den USA.
3. Durch mechanische Strahlenschutzmaßnahmen allein ist kein genügender Strahlenschutz zu erreichen.
4. Die Höhe der verabfolgten Strahlendosis ist weitgehend abhängig von den persönlichen Vorsichtsmaßnahmen. Wenn auch durch verbesserte Arbeitsmethoden und optimalen mechanischen Strahlenschutz keine tragbare Strahlenbelastung zu erreichen ist, kommt nur noch eine Beendigung der Arbeit bzw. ein Wechsel des Personals in Frage.

Herrn Professor Dr. B o n s e möchte ich danken dafür, daß er das Thema dieser Arbeit zur Verfügung stellte und besonders für die freundliche Unterstützung.

Mein Dank gilt auch Herrn Professor Dr. W a c h s m u t h für die Übernahme des Korreferates.

Literaturverzeichnis

1. von Albertini, A., Schweiz. med. Wschr. **1948**, 287. Über schwere Thorotrastschädigungen der Leber
2. Bauer, K. H., Das Krebsproblem. Berlin, Göttingen, Heidelberg. Springer Verlag (1949)
3. Behounek, F. und Fort, M. Strahlenther. **70**, 487 (1941) Joachimsthaler Bergmannskrankheit
4. Berner, F., Strahlenther. **75**, 433 (1944) Erfahrungen mit dem Auerdosiskop
5. Beutel, A. und Skopal, F. Strahlenther. **98**, 570 (1955) Beobachtungen beim Röntgenkrebs
6. Bloom, W., Radiology (New York) **49**, 344 (1947) Histological changes following radiation exposures
7. Bloom, W. und Jacobson, L. O. Blood (Baltimore) **3**, 586 (1948) Some hematologic effects of irradiation
8. Bordier, H., Paris méd. **I**, 109 (1931) Cancer consécutifs aux radiodermites. Leur évolution. Leur traitement
9. Dresel, H., Diskussionsbeitrag in: Wissenschaftliche Grundlagen des Strahlenschutzes, 216. Herausgeber: B. Rajewsky. Verlag G. Braun, Karlsruhe (1957)
10. Eberhardt, H. und Jaeger, R. Fortschr. Röntgenstr. **76**, 382, (1952) Das Kryptometer, ein neues Strahlenschutzmeßgerät
11. Fassbender, H., Strahlenther. **85**, 41 (1951) Isotopenmeßgeräte und ihre Anwendung in der Medizin und ihr verwandten Wissenschaften
12. Frank, J., Strahlenther. **84**, 147 (1951) Zur Feststellung schädlicher Strahlen
13. Gebauer, A. und Heinecker, R., Strahlenther. **98**, 558 (1955) Jatrogene und gewerbliche Radium- und Thoriumschäden
14. Gebe, S. F., Strahlenther. **94**, 311 (1954) Beitrag zur Frage der Thorotrastspätschädigung. Eine myeloische Leukämie nach diagnostischer Thorotrastapplikation
15. Geist, R. M., Glasser, O. und Hughes, C. R. Radiology (New York) **60**, 186 (1953) A radiation exposure survey at the Cleveland Clinic Foundation
16. Glocker, R. und Kaupp, E., Strahlenther. **20**, 144 (1925) Über den Strahlenschutz und die Toleranzdosis
17. von Gorup, G., Strahlenther. **85**, 467 (1951) Technik des Strahlenschutzes in medizinischen Radiumbetrieben
18. Greening, J. R., Brit. J. Radiology **26**, 261 (1953) Radiation monitoring in the hospitals of Great Britain
19. Grützmacher, K. Th. Strahlenther. **72**, 330 (1943) Beitrag zur Frage des Röntgenkarzinoms
20. Hanson, F. B. und Heys, F. American Naturalist **66**, 335 (1932) Radium and lethal mutations in *Drosophila*. Further evidence of the proportionality rule from a study of the effects of equivalent doses differently applied
21. Henshaw, P. S., Radiology (New York) **43**, 279 (1944) Leukemia in mice following exposures to X-rays
22. Hesse, O., Fortschr. Röntgenstr. **XVII**, 82 (1911) Das Röntgenkarzinom
23. Hueper, W. C., Fol. haemat. (Leipzig) **52**, 167 (1934) Leucemoid and leucemic conditions in white mice with spontaneous mammary carcinoma
24. Hug, O., Der Landarzt **32**, 78 (1956) Schädigungen durch ionisierende Strahlen
25. Jaeger, R., Strahlenther. **82**, 515 (1950) Strahlenschutz
26. Kaplan, H. S., Acta Unio internat. Cancer. (Bruxelles) **7**, 849 (1952) Radiation induced lymphoid tumors of mice.
27. Langendorff, H., Spiegler, G. und Wachsmann F., Fortschr. Röntgenstr. **76**, 143 (1952) Strahlenschutzüberwachung mit Filmen
28. Langendorff, H. und Wachsmann, F., Fortschr. Röntgenstr. **80**, 382 (1954) Ergebnisse der Strahlenschutzüberwachung mit Filmen
29. Libby, W. F., Science **122**, 57 (1955) Dosages from natural radioactivity and cosmic rays.
30. March, H. C., Radiology, (New York) **43**, 275 (1944) Leukemia in Radiologists period
31. March, H. C., Am. J. Med. Science **220**, 282 (1950) Leukemia in Radiologists in a 20 years
32. Marquardt, H., Die Toleranzdosis vom genetischen Standpunkt gesehen. In: Wissenschaftliche Grundlagen des Strahlenschutzes, 217. Herausgeber: B. Rajewsky. Verlag G. Braun, Karlsruhe (1957)
33. Martland, H. S., Am J. Cancer **15**, 2435 (1931) The occurrence of malignancy in radioactive persons
34. Muller, H. J., Strahlenther. **85**, 362 und 509 (1951) Strahlenschädigungen des genetischen Materials
35. Meesen, H., Dtsche. med. Wschr. **80**, 169 (1955) Zur „Pathologie der Therapie“
36. Muth, H. und Hug, O., Laboratoriumseinrichtungen, Arbeitsmethoden, Strahlenschutzmaßnahmen. In: Künstliche radioaktive Isotope in Physiologie, Diagnostik und Therapie, 120. Redigiert von H. Schwiege. Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg (1953)
37. Muth, H. und Hug, O., Strahlenther. **85**, 750 (1951) Schutzmaßnahmen bei Verwendung künstlicher, radioaktiver Substanzen

38. Muth, H., *Strahlenther.* **94**, 527 (1954) Strahlenschädigungen durch ionisierende Strahlen
39. Muth, H., Zusätzliche Strahlenbelastung durch zivilisatorische Einflüsse. In: *Wissenschaftliche Grundlagen des Strahlenschutzes*, 196. Herausgeber: B. Rajewsky. Verlag G. Braun, Karlsruhe (1957)
40. Mutscheller, A., *Am. J. Roent.* **13**, 65 (1925) Physical standards of protection against Roentgenray dangers
41. Noorgard, F., *Am. J. Cancer* **37**, 329 (1939) The development of fibrosarcoma as a result of the intraarticular injection of radium chloride for therapeutic purposes. A new form of radium poisoning in human beings.
42. Patterson, J. T., *Biolog. Bulletin* **61**, 137 (1931) Continuous versus interrupted irradiation and the rate of mutation in *Drosophila*
43. Peterson, O., *Acta Radiologica* (Stockholm) **42**, 2221 (1954) Strahlenkrebs, Bericht über 21 Fälle
44. Pychlau, H., *Strahlenther.* **83**, 245 (1950) Dosismessgeräte
45. Rajewsky, B., Schraub, A. und Kahlau, G., *Naturwissenschaften* (Berlin) **31**, 170 (1943) Experimentelle Geschwulsterzeugung durch Einatmung von Radiumemanation
46. Rajewsky, B. und Muth, H., *Strahlenther.* **88**, 361 (1952) Untersuchungen zum Problem der Radiumvergiftung
47. Rajewsky, B. und Jaeger, R., *Strahlenther.* **90**, 373 (1953) Methodik der Strahlenschutzmessungen bei Röntgen- und Gammastrahlung unter Verwendung neuer Instrumente
48. Rajewski, B., *Strahlendosis und Strahlenwirkung*, Stuttgart, Georg Thieme Verlag (1954)
49. Rajewsky, B., Diskussionsbeitrag. In: *Wissenschaftliche Grundlagen des Strahlenschutzes*, 232. Herausgeber: B. Rajewsky. Verlag G. Braun, Karlsruhe (1957)
50. Randerath, E., *Klin. Wschr.* **1932**, 144. Anatomische Befunde nach intravenöser Thoriuminjektion (Präparat „Thorotrast Heyden 1037a“) beim Menschen zum Zweck der Hepatolienographie.
51. Robb, T. M. und Ellis, R. E., *Brit. J. Radiology* **25**, 100 (1952) The use of small protection films for the estimation of the doses received on the fingers and hands during Radium manipulations
52. Rof, J., *Fol. haemat.* (Leipzig) **46**, 420 (1932) Über die Einwirkung des Thorotrast auf das Blut und die blutbildenden Organe
53. Rostokij, Saupé und Schmorl. *Zeitschr. f. Krebsforsch.* **23**, 360 (1926) Die Bergkrankheit der Erzbergleute in Schneeberg in Sachsen (Schneeberger Lungenkrebs)
54. Schraub, A., Die natürliche Strahlenbelastung. In: *Wissenschaftliche Grundlagen des Strahlenschutzes*, 188. Herausgeber: B. Rajewsky. Verlag G. Braun, Karlsruhe (1957)
55. Schubert, G., *Strahlenther.* **88**, 308 (1952) Moderne Probleme der Krebsentstehung und -bekämpfung vom Standpunkt des Biologen und Klinikers
56. Schubert, G. und Hähne, G., *Toleranzdosen*. In: *Künstliche radioaktive Isotope in Physiologie, Diagnostik und Therapie* redigiert von H. Schwiegl. Springer Verlag. Berlin, Göttingen, Heidelberg (1953)
57. Schulte, A., Schmidt, W. und Lapp, H., *Strahlenther.* **81**, 93 (1950) Klinischer und pathologischer Beitrag zur Frage der Schädigung durch Thorotrast
58. Spalding, C. K., Deamicis, E. und Cowing, R. F., *Nucleonics* **11**, 46 (1953) Radiation exposure survey of X-Ray and Isotope personel
59. Struppler, A., *Dtsche. med. Wschr.* **77**, 311 (1952) Ein Beitrag zur Frage der Thorotrastschädigung
60. Timofeëff-Ressovsky, N. W. und Zimmer, K. G., *Strahlenther.* **53**, 134 (1935) Strahlen-genetische Zeitfaktorenversuche an *Drosophila melanogaster*
61. Tischendorf, W., *Dtsche. med. Wschr.* **71**, 220 (1946) Lymphosarkomatose und Leukämie-begriff
62. Tönges, T. und Kalbfleisch, H. H., *Frankf. Zschr. Path.* **50**, 100 (1936) Ein zweiter Fall von tödlicher Lungenfibrose infolge von gewerblicher Radiumeinwirkung
63. Ulrich, H. N., *England J. Med.* **234**, 45 (1946) Incidence of Leukemia in radiologists
64. Zimmer, K. G., *Strahlenther.* **59**, 671 (1937) Über Strahlenschutzmessungen
65. DIN. Rönt. 2, 1930, Vorschriften über den Strahlenschutz in medizinischen Röntgenbetrieben
66. Fortschr. Röntgenstr. **78**, 494 (1953) Empfehlungen der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP 1950)
67. „The biological effect of Atomic Radiation“ Summary reports from a study by the National Academy of Science. National Research Council, Washington 1956. Veröffentlicht in *Science* 124, 1956. Zitiert bei Muth, H.: Zusätzliche Strahlenbelastung durch zivilisatorische Einflüsse. In: *Wissenschaftliche Grundlagen des Strahlenschutzes*, 196. Herausgeber: B. Rajewsky, Verlag G. Braun, Karlsruhe (1957)
68. Empfehlungen der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP 1953). Übersetzung der überarbeiteten Ausgabe vom 1. Dezember 1954. Veröffentlicht durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Braunschweig und Berlin (1955).

Lebenslauf

Am 10. Februar des Jahres 1933 wurde ich in Bocholt in Westfalen als Sohn des Lehrers Erich Vielhauer geboren. Von 1939 bis 1950 besuchte ich die dortige Volks- bzw. Oberschule. 1953 bestand ich in Borken in Westfalen die Reifeprüfung. Anschließend studierte ich zwei Semester in Münster. Vom Sommersemester 1954 bis zum Sommersemester 1958 war ich an der Universität Würzburg immatrikuliert. Dort bestand ich im Oktober 1955 die ärztliche Vorprüfung und am 16. Februar 1959 die ärztliche Prüfung.

Ich versichere ehrenwörtlich, daß ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfaßt und außer der angegebenen Literatur keine weiteren Hilfsquellen benutzt habe.

Ich versichere ehrenwörtlich, daß ich bisher von keiner anderen Seite ein Dissertationsthema zur endgültigen Bearbeitung erhalten habe.

Erich Vielhauer.

